

トンネル・地下空洞の耐震設計について

亀村勝美

深田地質研究所

Some Considerations on the Aseismic Design of Underground Structures

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：これまで地下空間に構築される様々な構造物は、建設コストは高いものの耐震性や耐久性に優れるというメリットゆえに建設されてきた。しかし、バブル経済崩壊後の社会にあっては漠然としたメリットを唱えるだけではその有用性は評価されず、性能の観点からの具体的な評価が重要となる。ここでは、地下構造物の耐震性評価の現状を調査し、その問題を明確にし、今後の課題について検討した。

キーワード：地下構造物，耐震性評価，トンネル，地下空洞，高レベル処分

Abstract: Up to now, various structures have been constructed in the underground space because they have advantages in earthquake resistance and durability, though the construction cost is high. However, these advantages are not accepted only by chanting a vague advantage in the society after the collapse of the bubble economy, and a definite evaluation from the viewpoint of the performance becomes important. Here, the current state of the aseismic assessment in underground structures was investigated, the problem was clarified, and future tasks were examined.

Keywords: underground structure, aseismic design, tunnel, underground cavern, high level radioactive waste disposal

1. はじめに

バブル経済華やかなりし頃、建設分野では地下空間の有効利用が叫ばれ、様々な構想が発表されていた。そしてバブルの崩壊！様々なものがその価値の根拠を失い、文字通り泡となって消えて行った。地下空間の有効利用も同様であり、現状は活用されているとは言い難い状況である。

では地下空間利用は、メリットの無いものなのであろうか？著者は、こうした現状を招いて

いる原因の一つに、地下構造物の建設コストの高さに加えてその性能が明確にされていないことを挙げ、地下構造物の設計に当たって、その静的安定性を検討するだけでなく、地震時の性能についても具体的に提示することにより、地下構造物の優位性が明確になり地下空間の利用の促進に繋がることを指摘してきた。

では具体的に地下構造物の耐震性はどう評価されているのであろうか？また、それは耐震性能として、他の構造物のそれと比肩し得るものであろうか？ここでは、これらの問いに答え

るべく、現行のトンネルなど地下構造物の耐震設計法を調査し、問題点の整理を行った上で地下構造物の耐震性評価における課題を抽出することを試みた。

地下構造物のメリットを具体的に示し、本当の意味で有効活用するためには、これまでのように「ニーズ（あるいはお金）があるから造る」のではなく、社会資本を有効に使い豊かで安全な社会を築くと言う社会的な要求に対しどう応えることができるのかを具体的に提示していく必要がある。本論文は、そうした取り組みを実現するに当たって、どのような問題があるのかを明らかにする試みの一つである。

2. 地下構造物の耐震性能評価の現状

様々な地下構造物の耐震性の現状について

述べる前に、それらのおおよその規模と深さを図1に示す。地下構造物には、都市部の地表面直下の地下鉄の駅や共同溝などの開削トンネル、もう少し深い深度の地下鉄、電力や通信用の洞道などのシールド、都市近郊の高速道路などのトンネル、そして山岳地帯の道路、鉄道のためのトンネル、更に地中深く岩盤中に建設される水力発電のための地下空洞や、石油、プロパンガスなどのエネルギー貯蔵のための地下空洞などがある。こうした地下構造物の設計法は、各々の構造物の主要な使用者で検討され、指針、基準、マニュアルなどとして整備されてきた。結果として構造物毎の設計体系が構築され、地下構造物の性能の観点から見ると必ずしも統一のとれたものとはなっていない。耐震性評価についても同様である。

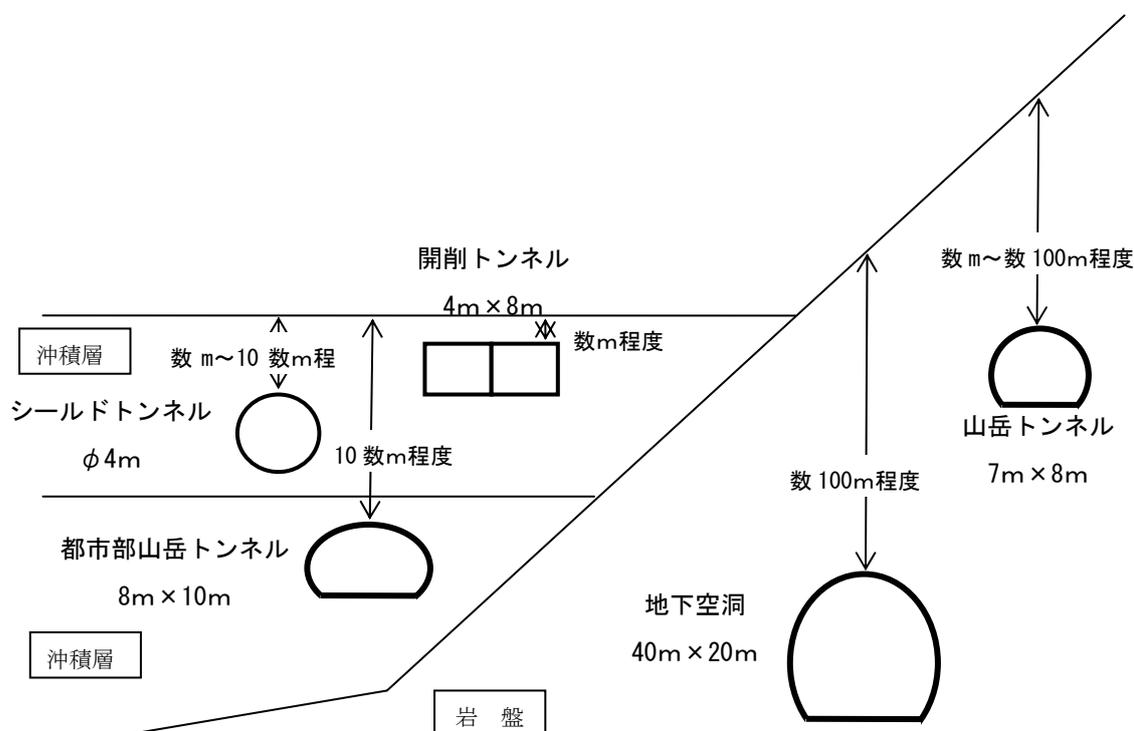


図1 地下構造物の種類とおおよその深度、大きさ（高さ×幅）

地下構造物の地震被害として直ぐにイメージされるのは、1995年の兵庫県南部地震における大開駅（神戸高速鉄道）の地表面陥没を伴う大崩壊であろう。しかしこれは地表面下の浅い位置に計画された駅に対し、構造物の施工基盤までを地表から掘削し、一度オープン（開削）の状況で躯体を構築した後埋め戻すという開削工法によるボックスカルバート構造である。一方、地中を掘削して造られるシールド工法トンネルや山岳工法トンネルではこれほど大きな被害は報告されていない。ではシールド工法トンネルや山岳工法トンネルは、高い耐震性を持っているのであろうか？ここではこれらの構造物に対しどのような耐震性の検討がなされているのかについて、その概要を示す。

2.1 シールドトンネル

シールドトンネルの耐震性の検討については、「シールドトンネルの耐震検討」（2007年土木学会トンネルライブラリー第19号）にその詳細が記載されている。それによると、シールドトンネルの耐震性を検討するに当たっての基本は、以下の2点にある。

- ① 構造物自身の応答は無く、周辺地盤の地震時挙動に追従する
- ② 剛性が小さい

①は山岳トンネルと同様地下構造物一般について言えることである。トンネルはその構造上、トンネル自体の見掛けの質量（単位長さ当たりの質量を断面積で除したもの）が周辺地盤の質量と比較し小さい場合が多く、地震時にトンネルに作用する慣性力は小さい。また周辺地盤の逸散減衰作用により、トンネル地震が固有の振動をすることは無いとされている。

②は、シールドトンネルならではの特徴であ

る。シールドトンネルの1次覆工は、主にコンクリートで作られるセグメントを組み合わせることによって作られている。一般に、セグメント間の接合部の剛性はセグメント本体の剛性より小さくなるため、断面方向、トンネル軸線方向ともに柔構造として考えられる。セグメントの設計では、この接合部の剛性評価とそのモデル化が重要な検討項目となっている。

こうした特徴からシールドトンネルの地震による被害は、兵庫県南部地震の際にもごく小さいものが報告されているだけで、先に述べたように耐震性は高いと言える。では、具体的に耐震性はどのように検討されているのであろうか？

地下構造物の耐震性の評価には、静的解析法と動的解析法がある。それぞれ特徴はあるが、比較的簡便でありかつ具体的な地震動を考慮できるということで、静的解析法の一つである応答変位法が用いられることが多い。

開削トンネルの耐震設計で用いられる応答変位法では、まず地震動を設定し、地盤の応答解析を行って地震時地盤変位を算定する。そしてこの地盤変位を図2に示すようにトンネル構造に地盤ばねを介して作用させる。

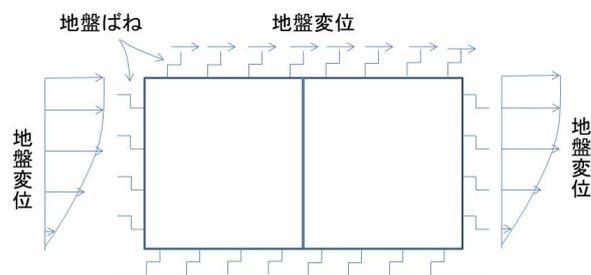


図2 応答変位法の概念

シールドの場合、構造解析で用いる「はりばねモデル」に特徴がある。すなわち②で述べ

た特徴を考慮し、セグメントをはり要素、セグメント継ぎ手を回転ばね、リング間継ぎ手をせん断ばねとしてモデル化する。

このようにシールドトンネルについては、開削トンネルと同等の耐震性評価手法が規定されている。

2.2 山岳トンネル

山岳トンネルの耐震性については、「トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説」(2006年土木学会)において以下の様に記述されている。

“第40条 地震、水圧、その他の影響”として「トンネルの設計にあたっては、トンネルの土被り、地形、地質、立地条件、周辺環境、使用目的等に応じ、必要により地震、水圧、その他の影響を考慮しなければならない。」とされている。

そしてその解説では、「トンネルは周辺地山と一体となって挙動するため、地表の構造物に比べて地震の影響が少なく、耐震性に富む構造物であると言える。したがって地山が良好なトンネルについては一般に地震の影響を考慮する必要はない。ただし、規模の大きい地震がトンネルの近傍で発生した際には、土被りの小さい坑口付近で斜面崩壊の影響を受けたり、覆工に変状が発生したりする場合がある。また既往の調査によれば、断層破碎帯や地質の急変部等において覆工コンクリートのアーチ肩部にひび割れ等の変状が発生した例もある。(省略)」と述べられている。

すなわち一般的な山岳トンネルでは、これまでトンネルを横断する断層のずれによる被害などを除くと、大きな地震被害もなく、耐震性の検討は行われてこなかった。ただ最近の能登半島沖地震や中越地震などの被害地震では、山



図3 2007年中越沖地震におけるトンネル被害例(土木学会トンネル工学委員会新潟県中越沖地震調査特別小委員会報告書より)



図4 1993年能登半島沖地震におけるトンネル被害例(金沢大 河野・石渡 被害状況調査報告より)

岳トンネルにおいても図3,4に示すような被害を生じており、山岳トンネルの耐震性評価についても課題ありとされた。

朝倉ら(2009)は、山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究を行い、具体的な被災事例の検討、そのメカニズムの検討そして耐震補強法の検討を実施した。そして基本的なメカニズムについては解明され、後は実構造物における地震動の計測を継続した上で設計指針のとりまとめ、適応性の検討を実施したいとしている。

一方、都市部の山岳トンネルについては、トンネル標準示方書においても構造上の配慮が必要になる場合もあるとして、第156条の解説において「・・良好な洪積地盤を対象とするトンネルでは、地震時の検討を省略している場合が多いが、坑口部付近の斜面が不安定な場合、土被りが小さく軟弱地山の場合、おぼれ谷を通過する個所のように地質が急変する場合、開削トンネルおよび立坑との接続部、大断面トンネルの場合等特殊な条件においては地震時の影響を検討する必要がある。」と記述している。そして具体的な覆工の設計については土木学会トンネルライブラリーを参考せよとしている。

この都市部山岳工法トンネルの覆工設計に関するライブラリーでは、設計用地震動の設定方法、地震時の構造計算等について詳細に述べられている。しかしこれらは、信頼性設計の考えに基づく限界状態設計法の議論の中でのトンネル覆工の性能照査の一部であり、今後実用に供するための解決すべき課題を多く含んだものとなっている。また既存の仕様規定に基づく設計法との対応が明確にされていないことにも留意する必要がある。すなわち、既に建設された都市部山岳トンネルの耐震性を信頼性設計の観点から評価することは現時点では困難である。

実際に山岳トンネルで耐震検討がなされている例は多くないが、論文等で公表されている事例を見るとシールドトンネルの項で示した応答変位法や複雑なトンネル構造と地盤との相互作用をモデル化するため地盤を有限要素法によりモデル化する応答震度法などが用いられている。

2.3 地下空洞

1) 地下発電所

地下発電所用空洞は、深いものでは400mの岩級区分 $C_H \sim B$ の堅硬な礫岩中に高さ50m、幅30mの大断面で長さ100-150mもの規模で掘削されるもので、掘削時の岩盤の安定性評価が最大の課題である。

その設計に当たっては、岩盤の非線形力学特性と掘削工法の特徴を考慮できる「粘性を考慮した非線形弾性逐次掘削解析法」（いわゆる電中研方式）による2次元有限要素法解析が用いられることが多い。その中で耐震性の検討は、掘削時に生じた岩盤の緩み領域に対し地震時の安定性を確保するための支保設計の一部として行われている。

具体的には、掘削による緩み領域を剛体と考え、静的震度を考慮した剛体すべり解析を行っている。図5に示すように、剛体の自重と地震による増分荷重に対し、吹付けコンクリートやPSアンカーなどの支保工の抵抗力と岩盤自身のせん断抵抗力によって所要の安全率を確保するものである。震度としては、水平0.06、鉛直0.06などの値が用いられているが、その設定根拠は明らかではない。また安全率としては、円弧すべり解析の場合で1.2とした例などがある。

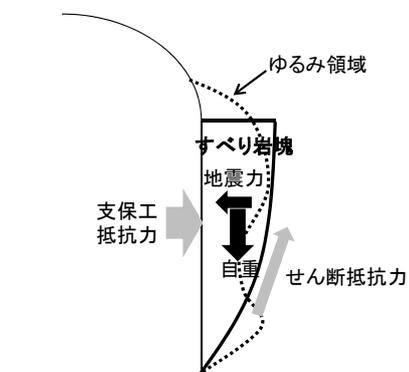


図5 地下発電所側壁部の安定計算概念

2) 地下備蓄空洞

エネルギー貯蔵用の地下備蓄空洞は、既に石油を対象としたものが串木野（鹿児島県）、菊間（愛媛県）、久慈（岩手県）の3地点に建設され供用されている。また、プロパンやブタンなどのガスを対象としたものは現在、倉敷（岡山県）と波方（愛媛県）の2地点で建設が進められている。

図6は、波方における地下備蓄用空洞を示したものである。高さ30m、幅26m、長さ485mの長大なトンネルが3本、深さ150mの花崗岩中に掘削されている。空洞の周囲は、空洞内に貯蔵されるガスを地下水によって封じ込めるための無数のボーリング孔が配置され常時安定した地下水条件が保たれるようになっている。

これらの地下空洞の設計は、山岳工法トンネルの標準工法であるNATMの考えに則って実施されているが、その耐震性についてはその施設の用途上、高圧ガス設備等耐震設計基準に準拠して行われている。その概要を以下に示す。

高圧ガス基準では、耐震設計の対象とする構造物の重要度をⅠ～Ⅲに分類し、各々の重要度に応じた耐震性能の評価を行うとしている。重要度Ⅰは最も重要度の高い設備で、「その損傷もしくは機能喪失が事業所外の公衆、公共財産、環境に多少の損害を与えるおそれのあるもの」とされている。そしてこのレベルの設備に対しては、「レベル1耐震性能評価及びレベル2耐震性能評価を行わなければならない」としている。

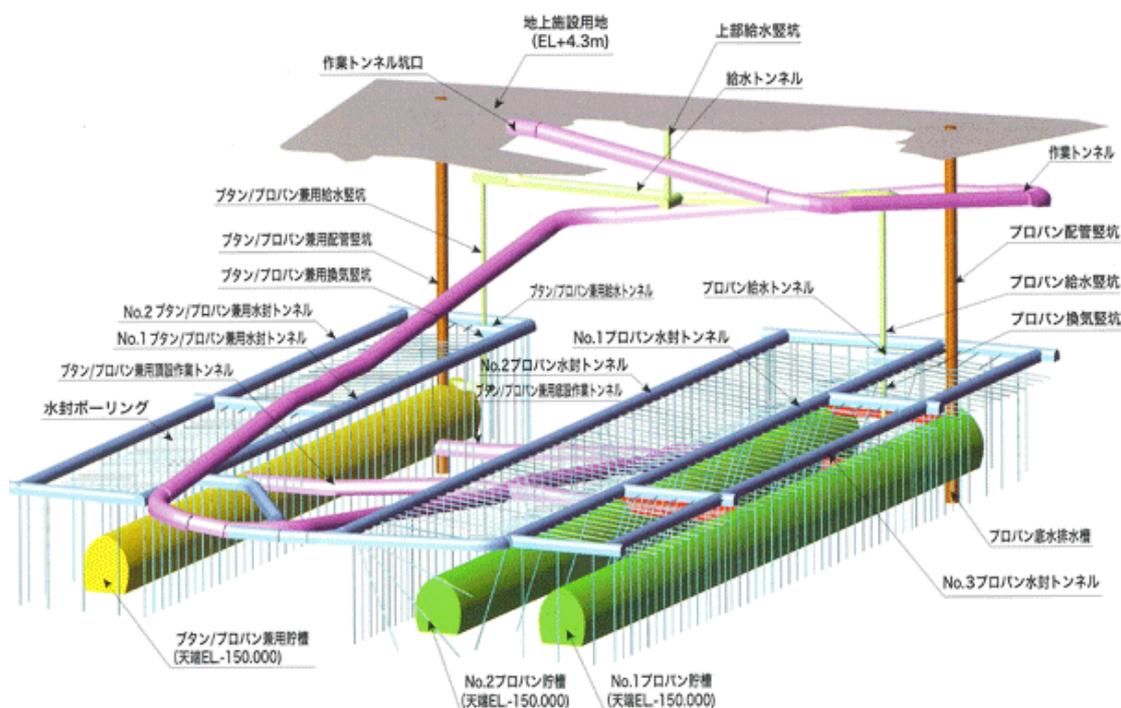


図6 波方プロパン地下備蓄基地
(工事パンフレットより)

レベル 1 耐震性能評価は、レベル 1 地震動（註：当該設備の供用期間中に発生する確率の高い地震動）に関して、地震後において当該耐震設計構造物に変形が残留しないで、かつ、当該設備が保有する高圧ガスの気密性が保持されることを、対象構造物の各部に生じる応力が許容応力以下であることを確認することにより行われる。

レベル 2 耐震性能評価は、レベル 2 地震動（註：当該設備の供用期間中に発生する確率が低い直下型、海溝型の巨大地震による高いレベルの地震動）に関して、地震中及び地震後において当該耐震設計構造物が保有する高圧ガスの気密性が保持されることを対象構造物に生じる塑性変形量が許容塑性変形量以下であることを確認することにより行われる。

石油プラントなどの工場設備に対する耐震性評価方法は、タンクやタワーなどの地上構造物ごとに明確に示されているが、岩盤構造物についてはそうではない。

石油やガスの貯蔵用空洞の具体的な耐震性能評価は、地下発電所と同様の静的震度法により行うが、岩盤に対しては許容応力を明確に設定できないため、支保工を含めて所要の安全率内になるようにしている。表 1 に安定性評価基準の例を示すが、その設定根拠は不明である。

表 1 地下備蓄空洞に対する地震時安定性評価基準例

項目	評価基準
ロックボルト軸力	SF \geq 1.2
吹付けコンクリートせん断強度	SF \geq 3.0
岩盤の剛体すべり安定性	SF \geq 1.2

高圧ガス基準に拠るレベル 2 地震動に対する重要度 I の構造物の静的震度は、岡山、愛媛地域においては水平 0.21、鉛直 0.105 と算定される。

2.4 高レベル放射性廃棄物処分施設

今や原子力エネルギーは我々の日常に不可欠なものとなっている。しかし一方で最終的に残る高い毒性を有する廃棄物の発生は不可避であり、これを如何に安全に処分するかが大きな課題として我々に突きつけられている。

わが国では国の原子力政策の一環として、こうした高レベル放射性廃棄物の処分についても長年にわたって研究開発が進められ、現在は地下数百メートル以深の岩盤中に埋設処分する地層処分が最も有力な方法として、その実現へ向けた取り組みが様々な機関によってなされている。

これまでの検討の中で図 7 に示すような処分場概念が提示されている。そしてこうした施設における安全性、実現性が空間軸では地球科学レベルから材料レベルまで、時間軸では数十年から数万年を対象として検討されている。勿論、わが国に於いては施設の耐震性も重要な検討課題である。

深地層研究施設や高レベル放射性廃棄物処分場のようなこれまでにない目的を持った構造物では特に

- アクセスとして長大な立坑を用いる。
- 同一の条件のもとで建設された構造物がないため、力学的安定性や地下水挙動などを経験によって評価することが難しい。
- 大深度かつ大規模な建設サイトを対象とした 3 次元地質調査手法が確立され

ていないため、十分な地質情報が事前に得られない。

- 期待される機能上、力学特性のみならず、水理学的特性の把握と評価が重要であり、より詳細な検証が必要である。
- 建設プロジェクトそのものが研究開発の社会的アピールである。
- 処分施設は埋め戻されるため、閉鎖後の再アプローチが出来ない。

などの理由により、予期しない岩盤変形挙動は施設の施工に係わるコスト増、工期遅延を招く恐れがある。また施設供用後のトンネル変状が施設の機能上の問題を生ずるリスクは通常の鉄道や道路のトンネルと比べると格段に大きい。

施設の耐震性に関する既往の設計研究を概括すると以下のようになっている。

- 対象：処分坑道（高さ 5m，幅 5m）
立坑（直径 6.5m，深さ数 100m）
- 手法：応答震度法（地盤応答解析から得られた加速度を震度に換算し、物体力としてトンネルを含む岩盤モデルに作用させる。）
- 入力地震：本来は、サイト条件を考慮した地震動を設定し用いるが、サイト未定のため設計研究ではインペリアルバレー波を用いている。
- 解析モデル：均質弾性体
- 結果：(処分坑)掘削時のひずみ値，安全係数が支配的であり，掘削時にロックボルトなどにより力学的安定が図られていれば，地震時も安定性は確保できる。

（立坑）軟岩の場合 360m以深で安全率が低下（1.19）するが，1.5 以下の範囲は壁面より 2m以内であり，安定性は確保できる。

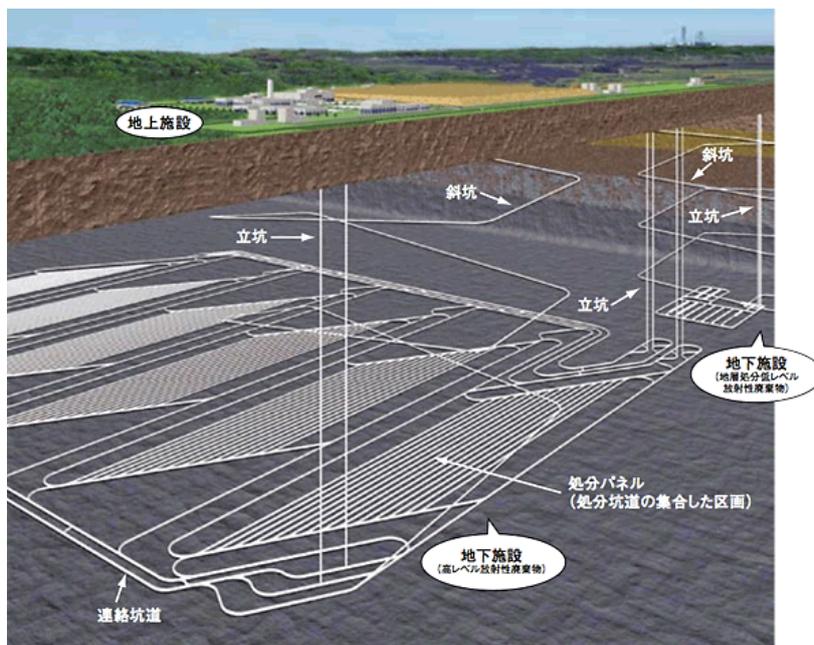


図7 高レベル放射性廃棄物地層処分場の概念（原子力発電環境整備機構（NUMO）ホームページより）

人工バリア、ニアフィールドについては、実験と解析の両面から検討が加えられている。解析は、トンネルの場合と同様の考え、地震動で行われている。

このように基本的な地震時の問題は既に検討されているものの、その内容は既往の地下構造物の概略検討の域を出ていないと言える。先に地震時の被災例で示したような地質上の問題がある場合、覆工背面の空洞の残置などの構造的弱部がある場合など、どのような問題が生じるのか、あるいはどのような条件が満たされれば問題となるような事象が生じないのかを検討する必要がある。

しかしこれまでの設計研究では、こうした施設完成時の初期欠陥については、検出・補修が可能であるとして変動シナリオから除外されている。一方で現状の山岳工法トンネルの維持管理においては、こうした構造の初期欠陥の問題点が数多く指摘されており、変動シナリオからの除外が適切なのか詳細に検討する必要がある。たとえ地下深部とはいえ、処分施設の重要性を勘案した場合、地震国であるわが国では避け得ない問題と思われる。

もう一つの地震時の問題として、岩盤の連成挙動による間隙水圧の上昇がある。これに対しては、「水圧の上昇は釜石等でも確認されているが、数ヶ月で回復しており、影響は小さい。」としている。しかし、これは点あるいは総量としての流量などによる判断と思われ、地震動による局所的な力学挙動とその結果としての透水性の変化などは不明である。

硬岩においても力学と水理の連成作用は確認されており、不連続性岩盤での力学的挙動の結果としての開口幅の変化による透水性の変化、地下水圧の変化による不連続面の変形は生

じている。このような場合、EDZ(Excavation Disturbed Zone：掘削影響領域)を含むニアフィールドの透水性に重大な影響を与えることが懸念される。

処分施設では、その施設の特性上、施工から供用にいたる一連の事業が大きな支障を来すことなく、継続されなければならない。これは、継続が出来なくなる事態が、処分技術の否定に直結する可能性があるからである。したがって一般的な山岳トンネルとは次元を異とした対応が求められる。耐震性検討についても、より詳細な検討が必要である。

3. 地下構造物の耐震性評価における問題点

3.1 地下構造物の耐震性の基本的考え方

土木学会地震工学委員会・トンネル耐震性研究小委員会は、H10.3「トンネル耐震設計の方向と基本課題」を取りまとめた。

その第二編、「震災時における地下施設の機能確保」の中で、道路トンネル、鉄道トンネル、地下街、通信用洞道、電力用洞道、共同溝、上下水道を対象とし、地震時に求められる機能確保のための基本条件として、以下を挙げている。

① 機能水準A

レベル2地震動に対しては、構造物あるいは付属施設が損傷しても当該地下施設が必要とする機能に重大な支障が発生せず、短期間での復旧が可能な範囲内の損傷にとどまる水準の地下施設。

② 機能水準B

レベル2地震動に対しては、構造物あるいは付属施設に当該地下施設の機能に影響を及ぼす被害が発生し、機能回復のための復旧工事を必要とする機能水準の地下施

設。このため、この施設は地震時の機能面から見て機能水準Aに比べて低い水準を有する。

こうした機能水準は構造物の重要度；

- 構造物の損傷が人命・生存に与える影響の度合い
- 発災後の避難・救援・救急活動と二次災害防止に影響を与える度合い
- 地域の生活機能と国際的視野も含めた経済活動に与える影響の度合い
- 都市機能の早期復旧に与える影響の度合い、および復旧の難易度

を基に決定する事が、阪神大震災を受けた1995年5月23日に土木学会から出された「土木構造物の耐震基準に関する提言」に示されている。

当然こうした重要度に加えて、地下施設の設置される地域の地理的、社会的条件や地形、地盤条件などの工学的条件について検討することが重要である。そして地下施設のうち、発災直後に避難・救援・救急活動のための機能が確保される必要があるものについては、新設時の機能水準の一部が被害により低下したとしても、直後の避難・救援・救急活動のためのある一定レベル以上の機能を要求されるとして、機能水準Aを満たすべく耐震性評価が行われる。

ここで重要なことは、こうした検討を実際に行うに当たっては、[機能]と[重要度]を明確にする必要があることである。しかし、トンネルをはじめとする地下構造物については、これらが必ずしも明確にされていない。このため、

- 地震による機能の低下がどこまで許されるのか？
- 機能低下があった場合の補修、復旧方

法は検討されているのか？

- 機能の維持を目的とした維持管理は行われているのか？

などの疑問に対して工学的な裏付けを持った答えを用意する必要がある。

3.2 地下構造物の耐震性評価における問題点

地下構造物は、文字通り地盤中に掘削により構築された構造物である。その機能、形状、設置震度、工法などの違いから様々なものがあるが、こと耐震性については2で述べたように対応がばらばらになっている。これは、構造物毎のこれまでの長い歴史の中で様々な経験を経て設計法が整備されてきたためであり、地下構造物間の耐震性の考え方、評価方法などの整合性は議論されてこなかった。しかし3.1で述べたように、阪神大震災を経験し多くを学んだ後は、地下構造物の耐震性についてもその機能と重要性に基づいて統一的な対応が取られるのが本来の姿であり、問題点を明らかにした上で早急な対応を取る必要がある。

表2は、地下構造物ごとの耐震性評価に関わる特徴を整理したものである。

山岳トンネルでは、開削やシールドと異なり地下深部に建設される。そして多くの場合、構造物周辺の地盤に関する建設開始前の情報は、地下浅部に比較すると少なく、多くの不確実性を含んでいる。こうしたことから山岳トンネルの施工に当たっては、掘削の進行とともに新たに得られる地盤に関する情報を次ステップの施工に反映させる「情報化施工」が採用されている。

一方で、このような事実は山岳トンネルの耐震性を具体的に評価しようとする場合に、大きな障壁があることを示唆している。すなわち開

表 2

		開削トンネル	シールドトンネル	都市部山岳トンネル	山岳トンネル	地下空洞	高レベル	
地盤	地質	・地下浅部でありボーリングなどの基本的な調査により推定可	<ul style="list-style-type: none"> ・事前調査で判ることには限られており、概略の条件しか推定できない ・施工情報により順次地盤条件の推定精度を上げていく 				<ul style="list-style-type: none"> ・広域大深度に対し順次詳細な調査が行われる ・概要調査から順次精度を上げる 	
	物性	・土質材料であり、基本的な試験により評価可 ・類似のデータが豊富であり、推定可	<ul style="list-style-type: none"> ・岩質材料では不連続面の影響があり、供試体レベルの物性値を地盤マスの物性値へどう関係付けるか、工学的判断が必要 ・調査では推定は困難 ・予期せぬ湧水により施工が困難となる 				<ul style="list-style-type: none"> ・山岳トンネルと同様の問題のほか、物性の時間依存性の評価が必要 ・施設の性能に大きく影響するものであり、詳細な調査と評価が行われる 	
施工	地下水	・調査により推定可	<ul style="list-style-type: none"> ・現場施工のため施工管理が難しい ・無筋コンクリートが多い 				<ul style="list-style-type: none"> ・調査により推定可 	<ul style="list-style-type: none"> ・山岳トンネルと同様であるが、品質管理に特段の注意を求められる。また長期安定性の評価が必要
	構造物(躯体)	・明かりで施工され、管理が容易 ・構造物周辺の地盤は埋戻され、管の品質は施工にさ理られる	<ul style="list-style-type: none"> ・工場で作成されるセグメントのため、明確な品質管理 ・周辺地盤に掘削による影響を与えない方法である 	<ul style="list-style-type: none"> ・掘削の影響によりゆるみ領域が形成される ・特性の変化領域とされるが具体的な評価は難しい ・掘削は新たな水理境界を形成し、湧水など区入り条件に大きな影響を与える 	<ul style="list-style-type: none"> ・ロックボルト、吹付けコンクリート、PSアンカーなどの支保で安定を図る 	<ul style="list-style-type: none"> ・ゆるみ領域の広がり、特性の時間依存性を含め詳細な評価が必要 		
耐震検討		<ul style="list-style-type: none"> ・簡便法 ・静的解析 ・動的解析 	<ul style="list-style-type: none"> ・応答変位法 ・応答震度法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ほとんど行われていない 	<ul style="list-style-type: none"> ・静的震度法 	<ul style="list-style-type: none"> ・応答震度法 ・動的解析 		

削トンネルやシールドトンネルと同様に応答変位法や応答震度法により耐震性の検討を行う場合、

① トンネル周辺地盤の状況が不明

事前には無理としても掘削時に弱層に遭遇した場合、その弱層がどのような形で分布しているのかは、トンネルの近傍はある程度調査により判明するものの、広範囲に亘り調査することは多大の費用と時間を必要とし、現実的ではない。

② トンネル周辺地盤の力学特性が不明

山岳トンネルでは、よほど地盤条件が良くない限り掘削により「ゆるみ領域」を生じる。そしてこれが地盤の不安定化に繋がらないようにロックボルトや吹付けコンクリートなどの支保工で地盤を補強しながら順次掘削を進めていく。

等の問題がある。

特にゆるみ領域は、掘削による応力解放の影響によりその力学(水理)特性が変化した領域と定義されるが、その具体的な特性の評価はまだ十分に行われてはいない。したがってトンネル完成後の地震時の安定性を評価する場合、このゆるみ領域をどうモデル化するのは難しい問題である。

4. まとめ

各種地下構造物に関する既存の設計法を耐震性検討の観点から概括し、問題点の抽出を試みた。その結果、地下構造物の高い耐震性のメリットを具体的に示すためには、以下の項目について検討を加え、具体的な形で取りまとめ、提示する必要があることが判った。

① 山岳トンネルの耐震検討の考え方、手法の明確化

② 地下構造物間の耐震性評価基準の統一

①については、朝倉らの研究で明らかにされた山岳トンネルの耐震性評価の考え方、手法についてより多岐にわたる検討を行い、耐震検討を行うべき山岳トンネルの条件を明示する必要がある。また合わせて既設トンネルの耐震診断法、耐震補強法などについて検討する必要がある。

②については、監督省庁あるいは事業主体の違いという大きな問題もあるが、まずわれわれ技術者が現状の技術を正しく認識し、構造物間の整合性を念頭に問題点を探り、具体的に検討していくことが必要である。

参考文献

- 亀村勝美(2009)：岩盤構造物の性能評価における課題について、深田地質研究所年報、第10号、pp133-148
- 亀村勝美(2010)：大深度地下空間開発の可能性を探るライフサイクルコスト評価、地盤工学会誌、58-4、pp8-11
- 朝倉俊弘、小島芳之、野々村政一(2009)：山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究
- 土木学会(2006)：トンネル・ライブラリー第15号、都市部山岳工法トンネルの覆工設計—性能照査型設計への試み—
- 土木学会(1996)：大規模地下空洞の情報化施工